

· 专题:双清论坛“月球科研站的关键科学问题” ·

载人航天再生生命保障技术和太空原位资源融合利用*

刘红^{1,2**} 付玉明^{1,2} 谢倍珍^{1,2} 冯佳界^{1,2} 刘慧^{2,1} 胡大伟^{1,2}

1. 北京航空航天大学生物与医学工程学院/环境生物学与生命保障技术研究所,北京 100083
2. 北京航空航天大学生物医学工程高精尖创新中心,北京 100083

[摘要] 载人航天器通过再生循环与原位资源利用的方式长期稳定供给人员生存所需的氧气、水和食物等生保物资并处理废物,是解决人类月球/火星驻留、飞火星等地外长距离飞行与驻留的核心技术。本文总结了再生生命保障技术的内涵,从水气再生、食物生产、固体废物循环、原位资源利用与系统人工调控五个方面概述了再生生命保障技术新进展与尚未解决的问题。最后,针对于解决驻留时间更长、飞行距离更远的任务,我们提出了构建下一代再生生命保障系统亟需解决的关键技术与基础科学问题。本文为多学科交叉合作建立载人航天器的新型生命保障系统,以期实现未来人员在太空长期驻留与星球拓殖提供了重要参考。

[关键词] 载人航天器;再生生命保障;空间原位资源;地外长期驻留;星际移民

1 研究背景

中国空间站将在 2022 年建成,这是继国际空间站之后,人类在载人航天领域又一项非凡成就。这意味着中国将有能力让航天员长期驻留近地轨道,为后继进行长距离太空旅行和在地球轨道以外建立基地奠定了重要基础。航天员长期地外驻留最大的挑战之一是如何以稳定和安全的方式为航天员提供基础的生保物资,即实现长期高可靠性的食物、水和可呼吸的大气的能力。据估计,航天员每人平均每天需要氧气 0.83 kg、水(包括卫生用水)15 kg、冻干的食物 0.65 kg,合计 16.5 kg。一个 3 人的乘员组每年总计需要约 18 000 kg 生保物资的有效载荷^[1]。由于载荷巨大,当执行离地球很远的载人飞行任务时,定期使用货运飞船进行补给具有很高的挑战性;同时,空间货物运输的价格昂贵,目前每公斤超过 10 000 美元,考虑运输成本的问题,这种方法很难实现^[2]。

再生生命保障是解决上述航天员长期地外驻留生命保障挑战的核心技术,其内涵是在载人航天器内通过一系列的物理、化学和生物的技术方法(如图 1),净化补充空气和水、生产食物以及处理废物,实现人



刘红 北京航空航天大学生物与医学工程学院教授、博士生导师,空天生物技术国际联合中心执行主任,“月宫一号”总设计师/首席科学家,国际宇航科学院院士、俄罗斯自然科学院外籍院士。长期从事太空生存生命保障理论和技术研究,承担完成国家自然科学基金项目、载人航天预研项目、民用航天项目等十余项,在国内外本领域重要刊物发表论文 100 余篇,取得授权发明专利 50 余项,从无到有建立了人类在外太空长期生存所需的生物再生生命保障系统理论和技术体系,研制出世界上第一个成功的四生物链环的生物再生生命保障系统“月宫一号”,实现了世界上最高的系统闭合度。荣获全国优秀教师、全国五一巾帼奖章,所带领的“月宫一号”团队荣获 2019 年中国青年五四奖章集体。

员生保物资尽可能地在轨再生重复利用,从而减少来自地面的物资补给,降低载人空间飞行任务对补给运力与成本的需求。

自 20 世纪 60 年代提出再生生命保障这项技术,至已有 60 余年历史^[3,4]。作为二代生命保障技术——物理化学再生生命保障技术,已经在和平号空间站与国际空间站^[2]、中国的天宫二号空间站实验室^[5]进行了应用,实现了从废物中循环再生氧气

收稿日期:2022-02-23;修回日期:2022-05-21

* 本文根据第 302 期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者,Email: lh64@buaa.edu.cn

和饮用水,在航天器的大气与水管理方面发挥着重要作用。然而,物化再生生命保障技术无法实现食物的原位循环再生,未利用的航天员生活代谢废物被储存,在重返地球大气层时销毁。能够完全实现水、氧气、食物原位闭合循环的是第三代生命保障技术——生物再生生命保障技术(也称为受控生态生命保障技术),依靠生物部件实现系统闭路循环,产生的所有废物均可回收再生循环利用^[4]。由于该项技术是最具有前景的下一代再生生命保障技术,俄、美、日、欧、中等航天大国和地区开展了大量研究工作,进行了地基循环再生系统实验研究^[4, 6]。但是由于系统的复杂性,目前只有部分生物部件已经在国际空间站与中国空间站进行应用^[7, 8],整体系统的生物再生技术尚未进行空间应用。

目前空间站的再生生命保障技术能够从尿液及空气冷凝水中再生 75% 的水,从航天员排出的 CO_2 中再生 50% 的氧气,不足的氧气和水以及全部的食物都依靠地面补给。这不仅费用高,而且可能由于天气等原因不能及时补给而危及航天员的生存,进而限制载人航天进一步向“驻留时间更长、飞行距离更远”的目标发展。我国载人航天的下一步目标是载人登月、建立载人月球科研站,进而载人飞火星、建立火星科研站。空间站距离地球仅约 350 千米,而月球距离地球 38.4 万千米、火星距离地球最近约 5 500 万千米,载人登火星单程至少需要一年半的时

间。这迫切需要更高效的再生生保系统及其和太空原位资源融合利用的方法,这是当前载人航天领域急需研究的关键科学和技术问题,亟需大力发展相关的新方法和新原理。若不能解决该问题,则严重影响我国下一代空间站以及载人月球科研站、载人登陆火星等载人深空探测战略计划的实施。

2 国内外研究进展

如前所述,载人航天器再生生保包括物化再生与生物再生两种方式。物化再生方式主要包括吸附、蒸馏、高温催化等物理化学手段,只能再生氧气和水;生物再生方式则构建由植物、动物、微生物等生物单元组成的系统,再生氧气、水和食物。两者具备不同程度的废物处理和太空原位资源融合利用能力。生物再生生命保障系统(Bioregenerative Life Support System, BLSS)是基于生态系统原理,由植物、动物、微生物组成的人工生态系统,能够循环再生人员生存所需的氧气、水和食物等生保物资^[1]。“建成具有自主知识产权的 BLSS,解决建立月球科研站生态环境中的关键性理论与技术问题,为火星长期居住解决生态生命保障问题”是我国空间科技发展的战略目标之一。以下从氧气和水再生、食物原位生产、废物循环处理、原位资源利用和系统人工调控五个方面综述这些技术的研究新进展。

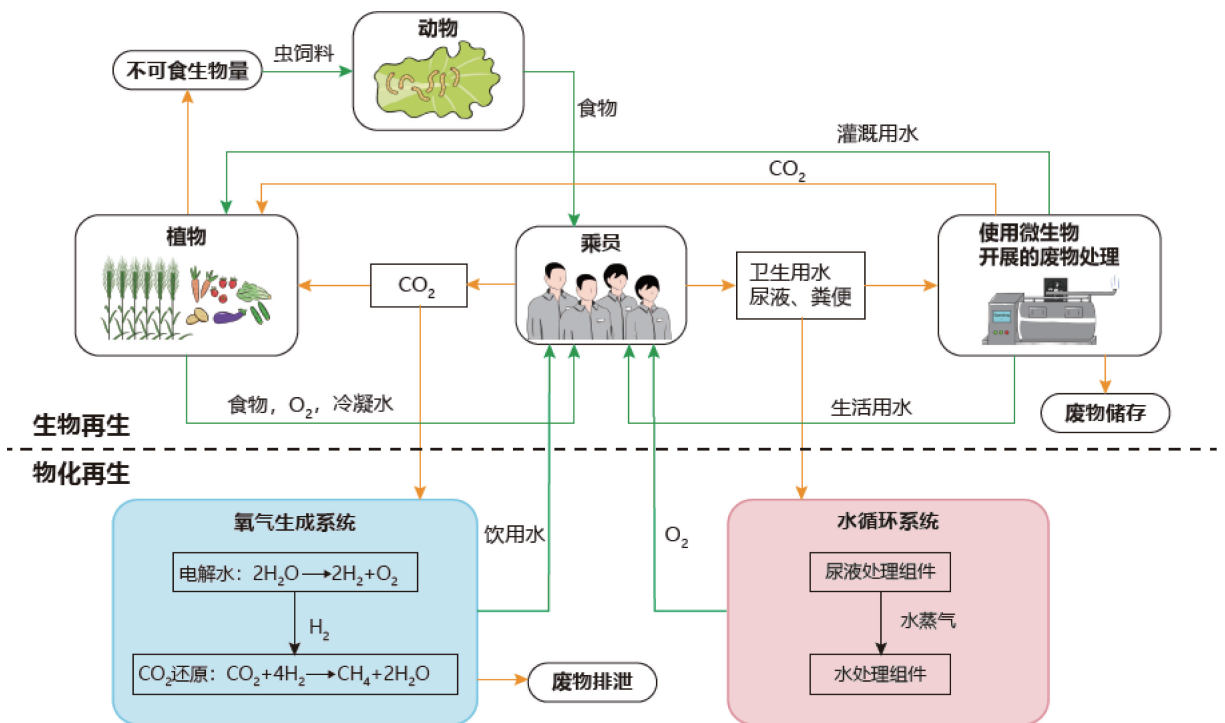


图1 载人航天器再生生保系统的结构和物质循环

2.1 载人航天器氧气与水再生方法研究进展

近地载人航天器采取物化再生式生保系统再生氧气和水以保障人员生存。氧气的物化再生技术方案主要有分子筛、固态胺吸附和电化学去极浓缩等 CO₂ 的收集、浓缩技术;博世(Bosch)反应、萨巴蒂尔(Sabatier)反应和二者结合的改进反应系统等 CO₂ 还原技术以及电解池电解水制氧技术等^[9]。国际空间站中采用的是四床分子筛收集浓缩 CO₂、萨巴蒂尔反应还原 CO₂ 联合固体聚合物电解池制氧的技术方案,但是氧气回收效率仅为 54%,并且萨巴蒂尔反应不充分,部分 CO₂ 损失于甲烷^[10];NASA 进一步研究了等离子体裂解甲烷或者霍尼韦尔碳气相沉积等萨巴蒂尔后处理技术实现 CO₂ 的完全还原,以期达到氧气回收 75%~90%的效率^[11-13],同时也积极开展基于博世反应的 CO₂ 回收方法以期实现 100%的氧气回收,但目前上述新技术的成熟度均相对较低,仅为 3~4 级^[14]。NASA 正在积极推进上述技术的空间测试。中国空间站在研制过程中则提出了固态胺 CO₂ 收集浓缩技术结合萨巴蒂尔反应和固体聚合物电解制氧的系统技术方案,地面系统实验显示可控制环境 CO₂ 浓度低于 0.5%,从 CO₂ 中回收氧的比例为 59%,但尚需解决固态胺材料使用寿命以及物质匹配等问题^[9];电解制氧采用质子交换水电解和静态水气分离技术方案,电极经过钝化、加载涂层等方式优化抗腐蚀性能,电解芯体优化布水均匀性,现可稳定运行时长达 23 000 小时,微重力水气分离器改用卷式有机膜结构,与传统平板式分离器相比减重 50%以上,有机分离膜改性处理和结合抑菌基团后可实现 6 个月抑菌效率不小于 70%。新兴技术手段加速了电解制氧技术的长寿命和轻量化进程,但是长期运行下多因素对材料特性和物理化学过程的影响还需要进一步研究^[15, 16]。

物化再生式生保系统亦可处理和再生利用水资源。在空间站所处的微重力环境下,没有流体静压力、重力驱动对流或沉积作用,液体的定向流动和分离难以进行,因此,必须采用不同于地面的废水处理方法。根据来源以及水质情况,空间站等近地中长期载人航天器中收集的废水可大致分为冷凝废水、卫生废水和尿液废水三类,俄罗斯“和平”号空间站和国际空间站美国舱段的水回收系统就是极具代表性的两种设计思路和空间应用范例。俄罗斯“和平”号空间站采用 3 条独立的净化回路来分别处理舱内冷凝水,卫生用水和航天员尿液,从而实现按照目标水质合理选择技术方案;而国际空间站美国舱段则

是首先处理尿液获得尿液蒸馏水,再统一处理尿液蒸馏水、冷凝水和卫生废水构成的混合污水,使水质达到电解制氧用水标准,可为航天员提供饮用水和卫生用水,单一净化回路的设计可以较好满足处理效率高和比能耗小的需求^[17]。中国空间站在欧美经验基础上,选择不同的污水采用物理隔离的独立净化回路完成处理。冷凝水处理以中温气相催化氧化技术为核心,净化后达到饮用水标准,供航天员饮用;尿液处理采用蒸汽压缩蒸馏技术方案,净化后主要用于电解制氧;而卫生洗浴废水采取蒸汽压缩蒸馏和反渗透膜处理相结合实现回用^[16, 18, 19]。再生式生保系统中尿液废水的处理被认为难度最大且最为关键。美国的磷酸预处理与蒸汽压缩蒸馏装置已实现了尿液中至少 85%的水回收率,但蒸馏后残留的浓盐水具有独特的物理稠度,很难去除。美国制备了特殊的离聚体—微孔膜浓盐水处理器,该装置利用航天器舱内空气的强制对流和专利膜蒸馏过程可在 26 天的周期内从 22.5 L 浓盐水中回收 80%的水,从而有望将国际空间站的整体水回收率提升至 98%,装置目前正在国际空间站中进行在轨实验^[20]。另外,蒸馏过程中总伴随有尿素的分解,出水的氨氮和总有机碳指标偏高。因此,研究者还提出了高级氧化法,包括早期提出的气相催化除氨法、超临界水氧化法以及较新的非热等离子体技术等,这些技术可将杂质较彻底地氧化成无害的小分子,从根本上改善出水水质,但能耗、安全性和微重力下运行的可靠性仍有待验证^[21, 22]。

总之,物化再生氧气和水的方案有较大的改进空间,需开发独立工作性能更强、更简单可靠以及相互匹配更容易的反应和系统,回收效率也需研究提升。与此同时,目前物化技术较严苛的反应条件、需地面补充反应物、需定期维护等问题可能在更长时间、更远距离的航天任务中变得更加严重,必须发展新方法和新原理。更长时间、更远距离的星际巡航、星球驻留和科研等载人深空探测任务必须使用生物再生法,即 BLSS 来再生氧气、水和食物。相对于物化再生系统各单元的相对独立,BLSS 的生物单元之间是耦合关系,这也增加了其复杂性和难度。

美国 NASA 自 20 世纪 90 年代开始支持开发了大量生物反应器用于处理空间废水,其核心功能主要是降低废水中的有机碳和氮的含量,并能够适应无重力环境^[23]。生物膜以及膜生物类处理工艺,因反应体积小、效率高而被认为是较有竞争力的技术^[24],典型如膜曝气生物膜反应器,其膜组件既是

曝气装置,又是生物膜附着载体,实现反应器集约,可通过膜材料改进,实现同步硝化/反硝化^[25-27]。我国福建农业科学院实验确定 10 m² 面积红萍基本上能满足 1 名乘员对氧气的需要^[28];北京航空航天大学“月宫一号”团队以“月宫 105”实验证明 69 m² 的植物栽培可以保障 3 人的氧气需求,并通过生物调控实现了系统中氧气和 CO₂ 浓度平衡^[29],发展的膜-生物活性炭反应器方法处理废水、尿液和回流营养液,实现了生保系统内水的 100% 再生^[30-32]。中国航天员中心“太空 180”实验则采用物化再生与生物再生相结合的方式实现 100% 的氧气和水的循环再生^[33-36]。但是,目前氧气和水的生物再生技术均处于地面实验阶段,尚未真正应用于载人航天器中,在太空环境下将受到的影响尚不明确,亟待研究。

2.2 载人航天器中食物原位生产研究进展

国际空间站和正在建设期的中国空间站的食物供给方式主要为携带式,依靠地面定期补给。而对于中长期太空飞行任务,如十人以上长期空间站和地外星球科研站等,食物必须原位再生才能长期可靠保障人员生存。物化再生系统无法生产食物,目前食物原位生产技术方案主要有两种:生物合成和 BLSS 中的高等植物栽培和动物培养。

生物合成是指基于合成生物学技术将 CO₂ 等原料转化为可食用的糖、氨基酸、蛋白质等物质。近年来合成生物学技术迅速发展,我国中国科学院天津工业生物技术研究所马延和团队用无细胞系统取得了将 CO₂ 转化为淀粉的技术突破,合成速率是玉米的 8.5 倍^[37]。然而,生物合成目前能够生产的多为简单的碳水化合物、氨基酸、蛋白质等,成本较高且不足以满足人类复杂的营养需求。而且,此项技术仍限于地面实验室研究阶段,有待深入开展研究,未来有望应用于载人航天器中作为食物的补充。

从心理接受度和营养健康保障两个方面,利用高等植物栽培和动物培养原位生产食物是首选的技术方案,航天大国均开展了大量研究工作。其中,利用高等植物栽培原位生产植物性食物研究包括两个大的方面。第一个方面是地面受控 BLSS 中的高等植物高效栽培理论和技术研究。开展了候选作物的筛选研究和环境因素的调控优化研究,环境因素包括人工光照(光强、光质、光周期、光照分布)、水肥供给及空气成分、温湿度等常规非生物环境因素,植株密度、植物间的化感互作、促生微生物等生物环境因素。俄罗斯曾在 BIOS-3 中原位再生了 70% 的食

物^[38];中国在“月宫 365”实验 100% 原位再生了 4 人生存所需的全部植物性食物^[39],在“太空 180”实验中也实现了食物再生 70%^[33]。然而,植物的生产效率仍需提升,且环境因素及其之间的协同调控机制远未明晰。

第二个方面是利用地面重力、辐射、磁场环境模拟器地基研究,搭载卫星、空间站、星球探测器等天基研究,探究空间环境的重力、辐射和磁场因素对植物生长发育、生理代谢和遗传表达等的作用,及面向微重力等太空特殊环境条件的高等植物生产技术和装置的研究。自 20 世纪 60 年代以来,美国和前苏联利用各种空间飞行器完成了多种作物“从种子到种子”的培养实验,并设计研制了 SVET 小型自动化空间温室、Svetoblock-M 装置和植物生长装置(Plant Growth Units, PGUs)等,并通过“月亮一探测器”系列和“阿波罗”系列探月飞船,开展了探月搭载高等植物种子的实验,研究结果与近地轨道搭载无显著差异^[40]。我国也先后利用返回式卫星和飞船开展了多次植物种子和高等植物栽培的搭载实验;还在地面利用微重力、辐射、磁场等特殊环境因素模拟器模拟研究了空间环境的影响。但是,空间环境条件对高等植物生长发育、遗传代谢的作用及其机制远未明晰,仍需开展深入系统的研究,为中长期太空飞行任务中高等植物高效原位生产提供理论基础和技术指导。

BLSS 中动物性食物原位生产可为人体提供优质的动物性蛋白,保障人体健康所必需的氨基酸供给,并提高系统的闭合度。以往已开展的大量研究工作主要集中在 BLSS 候选动物物种的筛选及其高效培养相关理论、技术和系统装置研究。目前研究者们筛选的能够在空间生保系统中培养,生产动物蛋白的候选物种可以归结为昆虫、甲壳类软体动物、鱼类、和畜禽类,具体包含蚕、黄粉虫、蜗牛、螺类、罗非鱼、剑尾鱼、中国草鲤鱼、鹌鹑、山羊等^[41]。蜗牛可以藻类、植物的不可食部分为食,美国和日本等国家曾将蜗牛作为 BLSS 中乘员的动物蛋白来源,并在地面建立了各类实验系统^[41]。中国科学家设计了可培养蜗牛的简单闭环水生培养系统^[42]。俄罗斯研究者提出了纳入螟褐云玛瑙螺和鹌鹑^[43]作为 BLSS 动物蛋白生产的候选动物,螟褐云玛瑙螺蛋白含量丰富,占可食部分干重的约 63%,而鹌鹑能够满足系统的能量效率和产量需求,饲养技术易于实现,在极端环境下能够保持稳定性及可以消耗系统中的不可食生物量。德国科学家利用 C. E. B. A. S.

(Closed Equilibrated Biological Aquatic System)实验模型开展了一系列包含蜗牛、鱼、微生物和水生植物的水生系统实验以及空间搭载实验^[44]。日本 CEEF(Closed Ecology Experiment Facilities)系统则采用植物的不可食生物量培养山羊,将羊奶作为食物为受试者补充动物蛋白,并且处理动物产生的固体废物和废水,生成 CO₂ 和植物营养液,用于植物栽培^[1]。综合分析动物培养中的废物处理、培养复杂度、食物来源、环境污染和人员食用心理问题,中国刘红团队最先提出将昆虫引入 BLSS,并筛选出蚕,利用植物不可食生物量培养蚕为乘员原位生产动物蛋白^[45],后经进一步研究分析,筛选出能够以植物不可食部分秸秆等为食物的黄粉虫作为 BLSS 动物性食物生产候选物种^[41],并在中国“月宫 365”实验中利用秸秆等植物不可食部分原位培养黄粉虫为志愿者提供了 11% 的动物蛋白^[39]。然而, BLSS 各类候选动物生产效率、生物转化效率等仍较低,且仍集中于地面研究,空间环境下开展的研究还较少,仍需在地面和空间环境下,针对候选动物种类筛选、高效培养技术和系统装置等开展深入研究,最终实现 BLSS 动物性食物的原位高效生产。

2.3 载人航天器中固体废物循环利用研究进展

固体废物(主要为植物不可食生物量和粪便)的高效处理和循环利用,是载人航天器中提升物质利用率的最大难点,是关乎运行成本的重要科学问题。目前国际上航天固废处理较成熟的应用是中短期载人航天任务中航天员生活、工作垃圾和粪便等的收集、减量化、水分回收以及储存的安全化和稳定化等,如国际空间站使用的粪便收集系统以及针对固废脱水稳定化的微波辅助真空冷冻干燥和微波干燥技术等。而面向长期航天任务中更大量的固废,包括植物不可食生物量的减量化和资源化,被重点研究和评估的有焚烧、水汽重整、湿式氧化以及超临界氧化等技术。这些基于热化学反应的固废处理方式效率较高,但存在设备复杂、反应条件较苛刻以及气体污染等问题。

生物再生生命保障技术以微生物处理固废,其流程简单、条件温和,且产物可重新利用,是目前面向较长期航天任务的主流技术路线。微生物处理技术是美国人很早就提出的一种处理技术。首先将植物不可食生物量烘干粉碎,然后放入生物转化器,使其在 35~70℃ 条件下进行生物好氧降解,降解所得的基质浸提液作为下一批植物的营养液。美国学者 Trotman 等人已经利用这种微生物处理技术处理不

可食生物量,并成功地将基质浸提液应用到小麦和马铃薯等作物的连续栽培中^[46, 47]。俄罗斯提出了类土壤基质处理技术,即用蘑菇和蚯蚓处理固体废物,形成类土壤基质再用于植物栽培,发现所栽培的小麦和萝卜的产量与水培对照无显著差异^[48]。北航“月宫一号”团队发展了生物处理转化固体废物技术,并在 105 天地面密闭有人实验“月宫 105”中处理了 16.08 kg 粪便和 17.47 kg 植物废物,产物以 5% 干重的比例施用时,对小麦生理生化参数无显著抑制^[49]。空间环境对固废处理利用过程的影响对载人航天器中的应用非常重要,是未来研究的重点方向。空间环境下真菌 *Trihoderna viridae* 对挥发性有机物的降解效率明显低于地面对照,原因可能是由于空间生物反应器缺乏曝气装置^[50]。

固废中有机物以及各营养元素在处理过程中的实际转化水平如何、空间环境的影响、可能产生的有害气体和微生物污染的程度等是尚未解决的难点,需利用组学和空间技术等前沿技术深入开展基础研究。

2.4 地外星球资源原位融合利用研究进展

物质补给是载人航天器所面临的最大问题。若能开发地外星球原位物质资源并融合利用,可进一步减少物质补给需求,提高星球基地的自治性,提升深空探测的可行性。在地外原位资源当中,月壤、火星壤等星球表层物质最为丰富且易得,最具开发潜力。在载人航天器中,植物作为生命保障功能的核心单元需要大量栽培基质,不可能从地球运输。而月壤等可以作为植物栽培基质。月壤理论上不具备生物毒性,但由于地外不存在生物风化作用,其具有颗粒粗糙尖锐、持水能力差、容重偏大、pH 偏高等不利于栽培的物理化学性质。而火星壤则具有生物毒性。因此,需开展月壤等星球表层物质改良研究,以形成接近地球土壤性质的基质用于植物栽培。

模仿地球土壤所经历的生物风化作用,加入有机物和微生物以改良月壤是主流的技术路线。落叶堆肥和切碎的黑麦叶子的加入都改善了模拟月壤所栽培植物的生长,但仍不及地球土壤^[51]。北京航空航天大学“月宫一号”团队使用有机固体废物(植物残体、人粪和微生物)与模拟月壤混合共发酵来改良这些性质。研究发现模拟月壤所栽培的小麦苗长仅为蛭石栽培的 25%,无法满足生命保障的要求,而初步改良工艺将苗长提升至蛭石的 65%^[52],仍需继续优化,且发酵期间显著增多的钠离子说明生物风

化作用腐蚀了月壤颗粒,初步揭示了改良机理。然而,月壤等星球表层物质的生物可利用性改良还需要在成像和组学等多方面深入开展机理研究,如使用荧光显微镜结合微流控芯片技术来观察改良和生物利用过程,以充分完善载人航天器中再生生保技术水平。

2.5 载人航天器再生生保系统人工调控研究进展

物化生保系统和 BLSS 的设计、建造和运行的理论基础是控制论,其核心指标是系统运行的稳定性——系统的物流和能流必须稳定在标称水平上,同时具有良好的抗扰动能力。目前大多采用开环控制的方法,而不是基于生保系统运行状态的反馈去控制系统的运行。例如,为了将 BLSS 地基实验系统—BIOS-3 中的气体浓度维持在设定的平衡点上,俄罗斯科学家在载人航天器生保系统原型设计时,利用系统的动力学模型,通过理论计算,保证在建造时系统内所有自养生物的同化商等于所有异养生物的呼吸商。这时 O_2 和 CO_2 设定的浓度,是系统模型(也是系统原型)的强吸引子。在扰动时,气体会自动恢复到设定的平衡点,不需要反馈闭环控制^[53]。然而开环控制方法极易受到内部变化和外部扰动的影响,常常不能保证控制过程的精度和稳定性。同时,一些基于经典线性控制的方法,如 PID 控制,虽然目前也应用到生保系统某些单元的闭环自动控制中,但是生保系统及其组成单元都是高度非线性的,当它们受到内部变化和外部扰动严重偏离标称水平时,很难通过线性调节的方法实现全局过程稳定控制^[54]。刘红团队在“月宫一号”中运用基于生态热力学及耗散系统理论的方法初步实现了系统的全局稳定控制——以生态信息、系统动态和贮能为基础,建立了具有明确生态学意义的 Lyapunov 函数,以及相应的 BLSS 运行闭环控制律^[55, 56]。如何基于更有效的系统运行状态反馈,建立闭环生保系统的非线性反馈控制方法,实现更加有效的系统全局稳定控制,仍然是今后生保系统构建中亟待解决的关键理论和工程问题。

3 结论与建议

随着人类载人航天事业的发展,载人航天器再生生保技术已经取得重要进展,水氧的物化再生技术、蔬菜的原位生产技术等已经应用于近地轨道载人飞行器。然而,为了保障国家载人航天月面科考站、载人登火星等未来航天任务的实施,仍需要结合任务目标大力攻关,着力解决驻留时间更长、飞行距

离更远所需的再生生保关键技术。亟需关键技术主要包括:(1)空间环境下 BLSS 平衡的调控技术。由地球生物组成的生物再生系统对空间环境存在应答和适应,这种应答和适应可能会造成系统单元间匹配稳定性发生波动,进而令系统整体生保功能发生改变,所以应明确重力、辐射、磁场变化等空间环境条件如何影响 BLSS 各生物单元及其相互作用机制,建立有效的系统平衡调控技术。(2)月面与火星等空间原位资源的生保融合利用技术,即如何有效利用星球的原位资源,如月壤、火星壤、月冰、火星水等,实现生命保障的水氧供给与食物原位生产,进一步减少甚至摆脱地球资源的供给。(3)载人航天器适居环境的生物安全防控与行星保护技术。微生物是 BLSS 系统的重要单元,在废物再生循环中发挥着重要功能。独特空间环境可能会导致生保系统中微生物发生变异,对航天员的健康构成潜在的威胁,诱发生物安全问题。同时,如果发生严重负向变化的变异微生物随航天员返回地球,可能发生行星保护的逆向污染,带来潜在的健康风险与生态灾难。因此,为了保障航天员安全与健康,预防行星保护逆向污染,有效的生物安全防控与行星保护技术也是当前急需攻关的关键技术。(4)BLSS 与物化系统有机结合的再生保障技术。BLSS 虽然可以持续生产食物和水氧,但是一旦偏离平衡稳态后恢复很慢。在缓慢的平衡恢复过程中,人员的生命保障物资无法全部由 BLSS 提供。而物化系统能快速再生水、氧气,能够在 BLSS 系统恢复期间发挥替代功能。因此,未来可以考量将二者有机结合,大幅增加航天器再生生保的冗余性与稳定性。

由于未来载人航天器再生生保系统的发展趋势必将是物化系统与生物系统的有机结合,因此亟需融合物理、化学、生物、工程与材料等多学科,针对人员生存需求开展空间环境下氧气和水再生、食物原位生产、固体废物循环利用以及星球资源原位融合利用等基础问题研究,开展各单元之间及其与人的匹配、再生生保系统调控机制研究,开展携带及多种再生方法融合机制研究等,为未来航天器建立新型生命保障系统、实现人员的太空长期驻留与星球拓殖提供基础。

参 考 文 献

- [1] Liu H, Yao ZK, Fu YM, et al. Review of research into bioregenerative life support system(s) which can support humans living in space. *Life Sciences in Space Research*, 2021, 31: 113—120.

- [2] Verbeelen T, Leys N, Ganigué R, et al. Development of nitrogen recycling strategies for bioregenerative life support systems in space. *Frontiers in Microbiology*, 2021, 12: 700810.
- [3] Grigoriev AI, Sinyak YE, Samsonov NM, et al. Regeneration of water at space stations. *Acta Astronautica*, 2011, 68(9/10): 1567—1573.
- [4] Guo SS, Mao RX, Zhang LL, et al. Progress and prospect of research on controlled ecological life support technique. *Reach*, 2017, 6: 1—10.
- [5] Lv MB, Li XP, Li YH, et al. UKF-based state estimation for electrolytic oxygen generation system of space station. *Applied Sciences*, 2021, 11(5): 2021.
- [6] Wheeler RM. Agriculture for space: people and places paving the way. *Open Agriculture*, 2017, 2(1): 14—32.
- [7] Tibbetts JH. Gardening of the Future—From Outer to Urban Space Moving from freeze-dried ice cream to fresh-picked salad greens. *BioScience*, 2019, 69(12): 962—968.
- [8] Shen YZ, Guo SS, Zhao PS, et al. Research on lettuce growth technology onboard Chinese Tiangong II Spacelab. *Acta Astronautica*, 2018, 144: 97—102.
- [9] 沈力平, 周抗寒. 空间站座舱大气再生技术实验研究. *空间科学学报*, 2000, 20(S1): 56—66.
- [10] Vogt C, Monai M, Kramer GJ, et al. The renaissance of the Sabatier reaction and its applications on Earth and in space. *Nature Catalysis*, 2019, 2(3): 188—197.
- [11] Abney M, Greenwood Z, Wall T, et al. Hydrogen purification and recycling for an integrated oxygen recovery system architecture// 46th International Conference on Environmental Systems. 2016.
- [12] Yates S, Childers A, Brom N, et al. Hydrogen Recovery by Methane Pyrolysis to Elemental Carbon// 49th International Conference on Environmental Systems. 2019.
- [13] Barta DJ, Stanley C, Lange K, et al. Improving the Recovery of Oxygen from Carbon Dioxide// 43rd COSPAR Scientific Assembly (COSPAR 2021). 2021.
- [14] Abney M, Gatens R, Lange K, et al. Comparison of Exploration Oxygen Recovery Technology Options Using ESM and LSMAC// 2020 International Conference on Environmental Systems. 2020.
- [15] 李俊荣, 尹永利, 周抗寒, 等. 空间站电解制氧技术研究进展. *航天医学与医学工程*, 2013, 26(3): 215—220.
- [16] 吴志强, 高峰, 邓一兵, 等. 空间站再生生命保障关键技术研究. *航天医学与医学工程*, 2018, 31(2): 105—111.
- [17] Carter DL, Tobias B, Orozco NY. Status of ISS Water Management and Recovery// 43rd International Conference on Environmental Systems. Vail, CO. Reston, Virginia: AIAA, 2013.
- [18] 杨松林, 丁平, 赵成坚, 等. 中国空间站水回收系统关键技术分析. *航天医学与医学工程*, 2013, 26(3): 221—226.
- [19] 丁平, 赵成坚, 姚菲菲, 等. 空间站洗浴废水净化技术研究. *载人航天*, 2017, 23(1): 39—44, 50.
- [20] Kelsey L, Boyce S, Speight G, et al. Closing the water loop for exploration; 2020—2021 status of the brine processor assembly// 50th International Conference on Environmental Systems. 2021.
- [21] Hicks MC, Hegde UG, Fisher JW. Investigation of supercritical water phenomena for space and extraterrestrial application// 10th International Symposium on Supercritical Fluids. 2012.
- [22] Meier A, Shah M, Quinn K, et al. Demonstration of Plasma Assisted Waste Conversion to Gas// 49th International Conference on Environmental Systems, 2019.
- [23] Campbell M, Vega L, Ungar EK, et al. Development of a Gravity Independent Nitrification Biological Water Processor SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States; SAE International, 2003.
- [24] Jackson WA, Morse A, Landes N, et al. An Optimum Biological Reactor Configuration for Water Recycling in Space SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States; SAE International, 2009.
- [25] Pickett MT, Roberson LB, Calabria JL, et al. Regenerative water purification for space applications; Needs, challenges, and technologies towards ‘closing the loop’. *Life Sciences in Space Research*, 2020, 24: 64—82.
- [26] Meyer CE, Pensinger S, Pickering KD, et al. Rapid start-up and loading of an attached growth, simultaneous nitrification/denitrification membrane aerated bioreactor// 45th International Conference on Environmental Systems, 2015.
- [27] Meyer CE, Pensinger S, Adam N, et al. Results of the alternative water processor test, a novel technology for exploration wastewater remediation// International Conference on Environmental Systems. 2016.
- [28] 陈敏, 邓素芳, 杨有泉, 等. 受控生态生命保障系统内红萍供氧特性研究. *空间科学学报*, 2012, 32(2): 223—229.
- [29] Fu YM, Li LY, Xie BZ, et al. How to establish a bioregenerative life support system for long-term crewed missions to the moon or Mars. *Astrobiology*, 2016, 16(12): 925—936.
- [30] Xie BZ, Zhu GR, Liu BJ, et al. The water treatment and recycling in 105-day bioregenerative life support experiment in the Lunar Palace 1. *Acta Astronautica*, 2017, 140: 420—426.

- [31] Zhu GR, Liu GH, Liu DL, et al. Research on the hydrolysis of human urine using biological activated carbon and its application in bioregenerative life support system. *Acta Astronautica*, 2019, 155: 191—199.
- [32] Zhao T, Liu GH, Liu DL, et al. Water recycle system in an artificial closed ecosystem - Lunar Palace 1: treatment performance and microbial evolution. *Science of the Total Environment*, 2022, 806: 151370.
- [33] 张良长, 李婷, 余青霓, 等. 4人180天集成试验环控生保系统设计及运行概况. *航天医学与医学工程*, 2018, 31(2): 273—281.
- [34] Li T, Zhang LC, Ai WD, et al. A modified MBR system with post advanced purification for domestic water supply system in 180-day CELSS: Construction, pollutant removal and water allocation. *Journal of Environmental Management*, 2018, 222: 37—43.
- [35] Zhang LC, Li T, Ai WD, et al. Water management in a controlled ecological life support system during a 4-person-180-day integrated experiment: configuration and performance. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 2080—2086.
- [36] Tang YK, Dong WP, Ai WD, et al. Design and establishment of a large-scale controlled ecological life-support system integrated experimental platform. *Life Sciences in Space Research*, 2021, 31: 121—130.
- [37] Cai T, Sun HB, Qiao J, et al. Cell-free chemoenzymatic starch synthesis from carbon dioxide. *Science*, 2021, 373(6562): 1523—1527.
- [38] Salisbury FB, Gitelson JI, Lisovsky GM. Bios-3: Siberian experiments in bioregenerative life support. *Bioscience*, 1997, 47(9): 575—585.
- [39] Fu Y, Yi Z, Du Y, et al. Establishment of a closed artificial ecosystem to ensure human long-term survival on the moon. *bioRxiv*, 2021.
- [40] Pearson DD, Provencher L, Brownlee PM, et al. Modern sources of environmental ionizing radiation exposure and associated health consequences//Kovalchuk I, Kovalchuk O. *Genome Stability*. Academic Press, 2021: 603—619.
- [41] Li LY, Zhao ZR, Liu H. Feasibility of feeding yellow mealworm (*Tenebrio molitor* L.) in bioregenerative life support systems as a source of animal protein for humans. *Acta Astronautica*, 2013, 92(1): 103—109.
- [42] Drayer GE, Howard AM. Modeling and simulation of an aquatic habitat for bioregenerative life support research. *Acta Astronautica*, 2014, 93: 138—147.
- [43] Kovalev VS, Manukovsky NS, Tikhomirov AA, et al. Modeling snail breeding in a bioregenerative life support system. *Life Sciences in Space Research*, 2015, 6: 44—50.
- [44] Li XY, Richter PR, Hao ZJ, et al. Operation of an enclosed aquatic ecosystem in the Shenzhou-8 mission. *Acta Astronautica*, 2017, 134: 17—22.
- [45] Liang X, Fu YM, Liu H. Isolation and characterization of enzyme-producing bacteria of the silkworm larval gut in bioregenerative life support system. *Acta Astronautica*, 2015, 116: 247—253.
- [46] Trotman AA, Almazan AM, Alexander AD, et al. Biological degradation and composition of inedible sweetpotato biomass. *Advances in Space Research: the Official Journal of the Committee on Space Research (COSPAR)*, 1996, 18(1/2): 267—279.
- [47] Trotman AA, David PP, Bonsi CK, et al. Integrating biological treatment of crop residue into a hydroponic sweetpotato culture. *Advances in Space Research*, 1997, 20(10): 1805—1813.
- [48] Manukovsky NS, Kovalev VS, Rygalov VY, et al. Waste bioregeneration in life support CES: development of soil organic substrate. *Advances in Space Research*, 1997, 20(10): 1827—1832.
- [49] Liu DL, Xie BZ, Dong C, et al. Effect of fertilizer prepared from human feces and straw on germination, growth and development of wheat. *Acta Astronautica*, 2018, 145: 76—82.
- [50] Ilyin V, Korshunov D, Deshevaya E. Biotransformation of used means of personal hygiene of cosmonauts and vegetable waste as applied to life support systems for space crews. *Ecological Engineering and Environment Protection*, 2018, 2018(1): 5—23.
- [51] Wamelink GW, Frissel J, Krijnen WHJ, et al. Crop growth and viability of seeds on Mars and Moon soil simulants. *Open Agriculture*, 2019, 4(1): 509—516.
- [52] Yao ZK, Feng JJ, Liu H. Bioweathering improvement of lunar soil simulant improves the cultivated wheat's seedling length. *Acta Astronautica*, 2022, 193: 1—8.
- [53] Gitelson JI, Lisovsky GM. *Man-made closed ecological systems*. Crc Press, 2002.
- [54] Poughon L, Farges B, Dussap CG, et al. Simulation of the MELiSSA closed loop system as a tool to define its integration strategy. *Advances in Space Research*, 2009, 44(12): 1392—1403.
- [55] Hu DW, Du XJ, Li LY, et al. Robust stability mechanism of an artificial ecosystem based on biological mutations and synergies driven by ecological information. *Ecological Modelling*, 2016, 319: 208—217.
- [56] Hu DW, Wang K, Hu JF, et al. Robust stability of closed artificial ecosystem cultivating cabbage realized by ecological thermodynamics and dissipative structure system. *Ecological Modelling*, 2018, 380: 1—7.

Regenerative Life Support in Manned Space Exploration and Integrated Utilization of Space In-situ Resources

Hong Liu^{1,2*} Yuming Fu^{1,2} Beizhen Xie^{1,2} Jiajie Feng^{1,2} Hui Liu^{2,1} Dawei Hu^{1,2}

1. *Institute of Environmental Biology and Life Support Technology, School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100083*

2. *Beijing Advanced Innovation Center for Biomedical Engineering, Beihang University, Beijing 100083*

Abstract Stably providing life-support goods and materials such as oxygen, water, and food needed for long-term human survival and disposing waste by recycling and in-situ resource utilization, manned spacecraft is the core transportation technology for long-term flight and residence in outer space such as to/on the Moon and Mars. In this review, we summarize the connotation of regenerative life support technology and digest the new progress and unsolved problems of regenerative life support technology from five aspects: water and gas regeneration, food production, solid waste recycling, and in situ resource utilization and system artificial control. Finally, for the next generation regenerative life support system with longer residence time and longer flight distance, we propose the critical technical and fundamental scientific problems that must be solved urgently. This review provides an important reference for establishing a new life support system for crewed spacecraft with multi-disciplinary cooperation to realize long-term residence and colonization in space in the future.

Keywords manned spacecraft; regenerative life support; space in-situ resource; extraterrestrial long-term survival; planetary colonization

(责任编辑 吴征天 张强)

* Corresponding Author, Email: lh64@buaa.edu.cn